

横缝间隙对拱坝应力状态的影响分析

孙林松¹ ,王德信² ,谢能刚³

(1. 扬州大学水利科学与工程学院 ,江苏 扬州 225009 ;2.河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098 ;
3.安徽工业大学机械工程学院 ,安徽 马鞍山 243002)

摘要 :考虑拱坝分期施工过程 ,采用常刚度加速迭代算法研究了横缝间隙对小湾拱坝应力状态的影响 .对灌浆后横缝没有间隙和存在 0.5 mm 的间隙两种情况进行的对比计算和分析结果表明 ,横缝间隙的存在对坝体应力分布规律的影响不大 ,但对应力的大小有较大影响 ,即坝体上游面拉应力大小和拱冠梁底部拉应力范围均有明显增大 .
关键词 :横缝 ;初始间隙 ;常刚度迭代 ;拱坝
中图分类号 :TV642.4 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2005)01-0076-05

由于施工的需要 ,拱坝中通常设置横缝 .在进行拱坝结构分析时 ,通常忽略横缝的影响 ,将坝体看作一个整体来研究^[1 2] .随着研究的深入和拱坝技术的发展 ,人们逐步认识到坝体横缝对拱坝应力状态的影响不容忽视 .文[3]考虑拱坝施工过程 ,研究了横缝对拱坝工作性态的影响 ,但该文假设横缝没有间隙 .实际上 ,灌浆之前横缝存在着一定的间隙 ,灌浆之后 ,一般情况下浆体可填满横缝间隙 ,但若灌浆质量不好 ,横缝仍可能存在间隙 .文[4]以一模型拱坝为例 ,分别考虑坝体有 1 条中缝、1 条边缝和 2 条对称边缝 3 类横缝布置情况 ,研究了横缝灌浆质量对拱坝受力的影响 .本文结合小湾拱坝这一实际工程 ,考虑坝体分期浇筑、分期灌浆过程 ,研究横缝间隙对坝体应力状态的影响 .

1 接缝模型与常刚度迭代法

设坝体区域用空间八结点等参元划分 ,单元总数为 N_{ED} ,划分时应注意使相邻坝段在接缝边界上的结点成对出现 .构造图 1 所示接缝单元 ,该单元由 4 对接触点对(1-5 ,2-6 ,3-7 ,4-8)组成 .设有限元离散后接缝单元总数为 N_{EC} .在接缝单元内部 ,相对位移增量 $d\Delta u$ 、接缝间隙 δ_c 等均可用如下形函数进行插值 .

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta) \quad (i = 1 \ 2 \ 3 \ 4) \tag{1}$$

写成矩阵形式有

$$d\Delta u = \begin{bmatrix} -N_{u1} & \cdots & -N_{u4} & N_{u1} & \cdots & N_{u4} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} du_1 \\ du_2 \\ du_8 \end{Bmatrix} = N_c du^e \tag{2}$$

$$\delta_c = \begin{bmatrix} N_{\delta 1} & N_{\delta 2} & \cdots & N_{\delta 4} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{c1} \\ \delta_{c2} \\ \delta_{c4} \end{Bmatrix} = N_{\delta} \delta_c^e \tag{3}$$

$$N_{ui} = N_{\delta i} = \text{diag}(N_i ,N_i ,N_i)$$
$$du_i = \begin{bmatrix} du_{ix} & du_{iy} & du_{iz} \end{bmatrix}^T$$

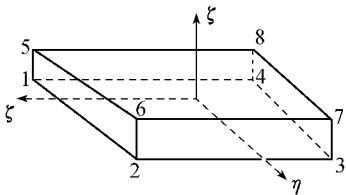


图 1 接缝单元
Fig.1 Joint element

$$\delta_{ci} = [\delta_{\tau_1} \quad \delta_{\tau_2} \quad \delta_n]^T = [0 \quad 0 \quad \delta_n^0]^T$$

定义接触相对位移增量为

$$d\epsilon_c = \begin{Bmatrix} d\epsilon_{\tau_1} \\ d\epsilon_{\tau_2} \\ d\epsilon_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d\Delta u_{\tau_1} \\ d\Delta u_{\tau_2} \\ d\Delta u_n \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \delta_n^0 \end{Bmatrix} = d\Delta u_c + \delta_c \tag{4}$$

$$d\Delta u_{\tau_i} = du_{\tau_i}^{(1)} - du_{\tau_i}^{(2)} \quad (i = 1, 2)$$

$$d\Delta u_n = du_n^{(1)} - du_n^{(2)}$$

文[5]仿照塑性力学,借助罚因子给出了接缝边界上接触条件的增量表示,包括:

本构方程
$$dp_c = D_c d\epsilon_c - D_c \frac{\partial g}{\partial p_c} \lambda \tag{5}$$

互补条件
$$f_m \lambda_m = 0 \quad \lambda_m \geq 0 \quad f_m \leq 0 \quad (m = 1, 2) \tag{6}$$

式中: f_1 ——法向屈服函数, $f_1 = p_n$; f_2 ——切向屈服函数, $f_2 = \sqrt{p_{\tau_1}^2 + p_{\tau_2}^2} + \mu p_n$; g ——势函数向量, $g = (g_1, g_2)^T$, $g_1 = p_n$, $g_2 = \sqrt{p_{\tau_1}^2 + p_{\tau_2}^2}$; λ ——流动因子向量, $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2)^T$, $f_m < 0$ 时 $\lambda_m = 0$, $f_m = 0$ 时 $\lambda_m \geq 0$; $D_c = \text{diag}(E, E, E)$, E 为罚因子.

利用虚功原理或变分原理写出经有限元离散后的系统控制方程

$$Kdu = H\lambda + dP + dP_\delta \tag{7}$$

$$K = \sum_{e=1}^{N_E} C_u^{eT} \left(\int_{\Omega^e} B^T DB d\Omega \right) C_u^e + \sum_{e=1}^{N_c} C_u^{eT} \left(\int_{S_c^e} N_c^T T^T D_c T N_c dS \right) C_u^e$$

$$H = \sum_{e=1}^{N_c} C_u^{eT} \left(\int_{S_c^e} N_c^T T^T D_c \frac{\partial g}{\partial p_c} dS \right) C_\lambda^e$$

$$dP = \sum_{e=1}^{N_E} C_u^{eT} \left(\int_{\Omega^e} N^T db d\Omega + \int_{S_p^e} N^T d\bar{P} dS \right)$$

$$dP_\delta = \sum_{e=1}^{N_c} C_u^{eT} \left(\int_{S_c^e} N_c^T T^T D_c N_\delta \delta_c^e dS \right)$$

式中: K ——包含接缝单元刚度的总刚度矩阵; H ——系统的势矩阵,与接缝单元的势函数有关; dP ——外荷载增量向量; dP_δ ——由接缝单元初始间隙引起的伪荷载向量; C_u^e ——单元的自由度选择矩阵; C_λ^e ——单元的流动因子选择矩阵.

流动因子向量 λ 中的元素反映了接缝单元的接触状态, λ_m 与屈服函数 f_m ($m = 1, 2$) 之间应满足互补关系式(6),因而流动因子向量 λ 非线性依赖于位移增量 du ,式(7)是关于 du 的非线性方程.

文[6]利用 Steffensen 加速技术给出了如下求解式(7)的常刚度加速迭代算法.

a. 令迭代次数 $k = 0$, 计算初值 $du^{(k)} = K^{-1}(dP + dP_\delta)$.

b. 置加速指标 $i = 0$, $x^{(i)} = du^{(k)}$.

c. 按下式计算 $\lambda^{(k)}$:

$$\lambda_1 = \begin{cases} 0 & \text{若 } f'_1 \leq 0 \\ d\Delta u_n^{(k)} + \delta_n^0 + f_1^0/E & \text{若 } f'_1 > 0 \end{cases} \tag{8}$$

$$\lambda_2 = \begin{cases} 0 & \text{若 } f'_2 \leq 0 \\ \frac{p_{\tau_1} d\Delta u_{\tau_1}^{(k)} + p_{\tau_2} d\Delta u_{\tau_2}^{(k)}}{\sqrt{p_{\tau_1}^2 + p_{\tau_2}^2}} + \mu(d\Delta u_n^{(k)} + \delta_n^0 - \lambda_1) + \frac{f_2^0}{E} & \text{若 } f'_2 > 0 \end{cases} \tag{9}$$

这里 $f'_1 = f_1^0 + E d\Delta u_n + E \delta_n^0$, $f'_2 = f_2^0 + E \mu(d\Delta u_n + \delta_n^0 - \lambda_1) + E \frac{p_{\tau_1} d\Delta u_{\tau_1} + p_{\tau_2} d\Delta u_{\tau_2}}{\sqrt{p_{\tau_1}^2 + p_{\tau_2}^2}}$.

d. 计算位移增量：

$$d\boldsymbol{u}^{(k+1)} = \boldsymbol{K}^{-1}(\boldsymbol{H}\boldsymbol{\lambda}^{(k)} + d\boldsymbol{P} + d\boldsymbol{P}_\delta)$$

(10)

e. 令 $i = i + 1$, $\boldsymbol{x}^{(i)} = d\boldsymbol{u}^{(k+1)}$.

f. 若 $i = 2$,按下式进行加速：

$$d\boldsymbol{u}^{(k+1)} = \boldsymbol{x}^{(0)} - \frac{(\boldsymbol{x}^{(1)} - \boldsymbol{x}^{(0)})^2}{\boldsymbol{x}^{(2)} - 2\boldsymbol{x}^{(1)} + \boldsymbol{x}^{(0)}}$$

(11)

g. 若 $\|d\boldsymbol{u}^{(k+1)} - d\boldsymbol{u}^{(k)}\| \leq \varepsilon \|d\boldsymbol{u}^{(k+1)}\|$,迭代结束.

h. 令 $k = k + 1$,若 $i = 2$,返回步骤 b ,否则 ,返回步骤 c.

2 横缝间隙对小湾拱坝应力状态的影响

小湾电站系澜沧江中下游的巨型电站 ,拦河大坝为混凝土双曲拱坝 ,坝顶高程 1 245.0 m ,坝底高程 953.0 m ,最大坝高 292.0 m ,坝顶中心弧长 922.74 m ,属 300 m 级高拱坝 .现采用上述模型和算法对封拱灌浆后横缝间隙对坝体应力的影响进行研究.

2.1 计算方案与模型

计算时模拟了坝体中的 42 道横缝 ,拱坝沿拱向分 43 个坝段 ,每个坝段沿拱向设 2 排单元 ,坝段和横缝沿径向设置 8 排单元 ,沿高度分 16 层单元 .有限元模型结点总数 25 087 ,单元总数 20 424.

考虑封拱灌浆后横缝的不同初始间隙 ,设计两种计算方案 (a)接缝灌浆前间隙为 2.0 mm ,灌浆后间隙为 0.0 mm (b)接缝灌浆前间隙为 2.0 mm ,灌浆后间隙为 0.5 mm .两种方案的计算荷载组合均为“ 大坝自重 + 上游坝面水压 + 温降 ”.上游水位取设计水位 1 240.0 m ,坝体自重按表 1 所列施工阶段分为 9 个荷载步施加 .

表 1 小湾拱坝施工阶段

Table 1 Construction phases of Xiaowan arch dam

荷载步	1	2	3	4	5	6	7	8	9
坝体浇筑高程/m	975.0	1 010.0	1 050.0	1 090.0	1 130.0	1 170.0	1 210.0	1 245.0	1 245.0
灌浆封拱高程/m		975.0	1 010.0	1 050.0	1 090.0	1 130.0	1 170.0	1 210.0	1 245.0

坝体混凝土与基岩采用线弹性模型 ,材料参数见表 2.横缝假设不抗拉 ,切向满足 Coulomb 定律

$$f = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} + \nu\sigma_n - c \leq 0$$

(12)

式中 : σ_n 以拉为正 ; ν , c 分别为摩擦系数与凝聚力 ,本文取 $\nu = 1.0$, $c = 0.8$ MPa.

2.2 计算结果与分析

表 3、表 4 给出了两种计算方案的坝体应力极值及其发生位置 ,图 2、图 3 为上游面第一主应力和下游面第三主应力等值线 .等值线图反映出横缝间隙对坝体应力分布规律影响不大 ,两种计算方案所得结果基本一

表 2 坝体和基岩材料参数

Table 2 Material parameter of dam and foundation

材料	E/GPa	$\rho g/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	μ	$\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$
坝体混凝土	21	24	0.167	0.86×10^{-5}
岩 体	22	27	0.180	

表 3 上游面应力极值及其位置

Table 3 Extreme stress and its position on upstream surface

方案	最大主应力 σ_1		最小主应力 σ_3		最大拱向压应力		最大梁向拉应力	
	数值/MPa	位置	数值/MPa	位置	数值/MPa	位置	数值/MPa	位置
(a)	6.99	▽960 左拱端	- 6.81	▽1170 拱冠	- 6.80	▽1170 拱冠偏右	3.43	▽959 右拱端
(b)	8.38	▽960 左拱端	- 6.72	▽1170 拱冠	- 6.71	▽1170 拱冠偏右	4.86	▽959 右拱端

表 4 下游面应力极值及其位置

Table 4 Extreme stress and its position on downstream surface

方案	最大主应力 σ_1		最小主应力 σ_3		最大拱向拉应力		最大梁向压应力	
	数值/MPa	位置	数值/MPa	位置	数值/MPa	位置	数值/MPa	位置
(a)	0.21	▽1245 左拱端	- 21.87	▽985 右拱端	- 0.66	▽1245 左拱端	- 14.20	▽985 右拱端
(b)	0.21	▽1245 左拱端	- 22.97	▽985 右拱端	- 0.59	▽1245 左拱端	- 14.90	▽985 右拱端

致,上、下游面应力均近似对称分布.但从表 3、表 4 可以看出,横缝间隙对梁向应力以及上游主拉应力和下游主压应力极值的影响较为明显:当封拱后的横缝间隙从 0.0 mm 增加到 0.5 mm 时,上游最大主拉应力从 6.99 MPa 增加到 8.38 MPa,增幅约为 20%,最大梁向拉应力则从 3.43 MPa 增加到 4.86 MPa,增幅达 42%;下游最大主压应力和最大梁向压应力分别增加了 1.10 MPa 和 0.70 MPa,约占 5%.分析其原因,主要是由于横缝初始间隙的存在破坏了拱坝的整体性,水压等外荷载的作用首先由梁单独承担,只有当梁的变形使得横缝闭合时,拱才开始发挥分载作用.这就导致了梁向应力以及主要受梁向应力影响的上游面主拉应力和下游面主压应力等随着横缝初始间隙的增加而增加.

图 4 给出了拱冠梁断面底部梁向应力和第一主应力的分布情况,从中也可以看出横缝存在初始间隙时,坝踵拉应力增大.而且就拉应力区而言,横缝的存在使得主拉应力区深度和梁向拉应力区深度均有所增加.其中梁向拉应力区深度从初始间隙为 0.0 m 时的 7.56 m 增加到初始间隙为 0.5 mm 时的 9.35 m,增幅 1.79 m,约 23.7%.

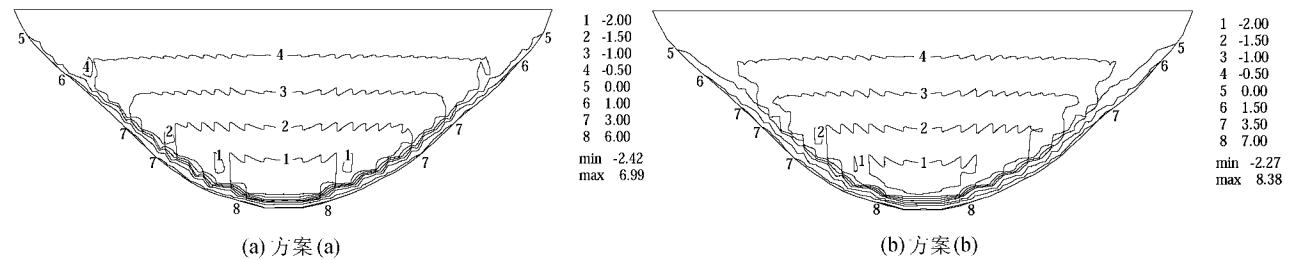


图 2 上游面第一主应力等值线(单位:MPa)

Fig.2 Contours of principal stress σ_1 on upstream surface

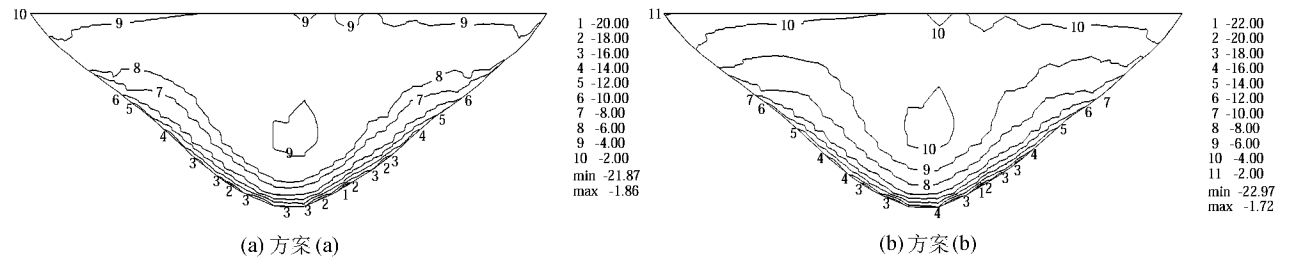


图 3 下游面第三主应力等值线(单位:MPa)

Fig.3 Contours of principal stress σ_3 on downstream surface

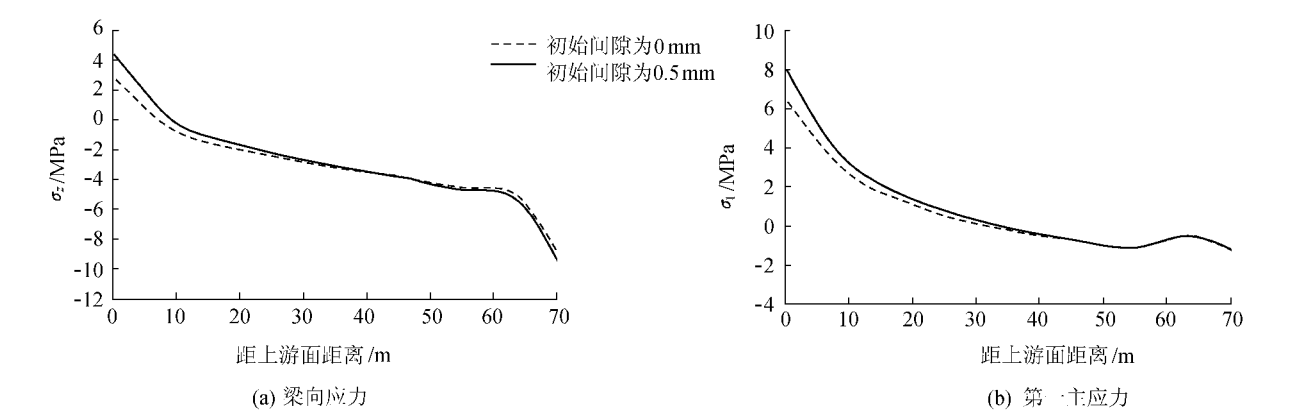


图 4 拱冠梁底部应力分布

Fig.4 Stress on the bottom of center cantilever

3 结 论

a. 横缝间隙的存在对小湾拱坝应力分布规律影响不大,这主要是由于小湾拱坝承受荷载中水压荷载所占比例较大,在其作用下间隙不大的横缝可以闭合,从而形成整体由拱梁共同分担荷载的状况.

b. 横缝间隙的存在对拱坝梁向应力以及上游主拉应力和下游主压应力等的大小有明显影响,其应力极值均有不同程度的增加,其中对上游面拉应力的影响尤为严重,而且拉应力区的深度也有所增加.这些变化恶化了坝体的应力状态.因此,施工中应注意横缝灌浆质量,应使浆体能填实间隙以保证拱坝的整体性.

参考文献：

[1] 黄文雄,许庆春,王德信.拱坝的非线性开裂有限元分析[J].河海大学学报,1994,22(5):100—103.
[2] 蔡新,郭兴文,王德信,等.拱坝整体非线性稳定分析[J].河海大学学报(自然科学版),1999,27(2):74—80.
[3] 李雪春,陈重华,徐昕.非整体拱坝结构分析研究[J].水利学报,2002(6):47—52.
[4] 李建新,王光纶,金峰.横缝结合质量对拱坝结构受力的影响[J].水力发电,2001(10):45—48.
[5] 孙林松,王德信,范崇军.三维摩擦接触问题的增量线性互补方法[A].见:白以龙,杨卫主编.力学2000[C].北京:气象出版社,2000.498—500.
[6] 孙林松,王德信.弹性接触问题的常刚度迭代方法及其加速[J].应用力学学报,2002,19(4):58—61.

Influence of gaps of transverse joints on stress of arch dams

SUN Lin-song¹, WANG De-xin², XIE Neng-gang³

- (1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou Univ., Yangzhou 225009, China;
2. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
3. College of Mechanical Engineering, Anhui Univ. of Technology, Maanshan, 243002)

Abstract In consideration of different construction phases of an arch dam, the influences of gaps of transverse joints on the stress of the Xiaowan arch dam were studied by use of the accelerated iteration method with a constant stiffness. A comparative calculation and analysis of the Xiaowan arch dam for two cases—0.5 mm gap of transverse joints and absence of gaps—shows that the gap has little influence on the stress distribution, but has obvious influence on the value of stress, and that the extreme value of tensile stress on the upstream surface and the tensile stress area on the bottom of cantilevers increase notably.

Key words transverse joint; initial gap; constant stiffness iteration; arch dam